



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

OPTIMISASI SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL PADA OPERASI MICROGRID SKALA LABORATORIUM DI LABORATORIUM SIMULASI SISTEM TENAGA INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER MENGUNAKAN SOFTWARE HOMER

Jatrifa Jiwa Gandhi
NRP 2212100156

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***OPTIMIZATION OF PV AND PV-DIESEL POWER SYSTEM ON
LABORATORY-SCALE MICROGRID OPERATION IN THE POWER
SYSTEM SIMULATION LABORATORY SEPULUH NOPEMBER
INSTITUTE OF TECHNOLOGY USING HOMER SOFTWARE***

Jatrifa Jiwa Gandhi
NRP 2212100156

Supervisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2016

**OPTIMISASI SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL PADA
OPERASI MICROGRID SKALA LABORATORIUM DI
LABORATORIUM SIMULASI SISTEM TENAGA INSTITUT
TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER MENGGUNAKAN
SOFTWARE HOMER**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



**Optimisasi Sistem Tenaga PV dan PV-Diesel pada
Operasi *Microgrid* Skala Laboratorium di Laboratorium
Simulasi Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh
Nopember Menggunakan *Software* Homer**

ABSTRAK

Jatrida Jiwa Gandhi 2212100156

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D

Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat dan semakin menipisnya bahan bakar fosil, mendorong penelitian terkait variasi sumber pembangkit meningkat. Salah satu contohnya ialah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Aplikasi dari PLTS ini sangatlah luas, salah satunya adalah pemanfaatan PLTS sebagai sumber dari *Microgrid* skala laboratorium. Dalam Tugas Akhir ini akan di simulasikan *Microgrid* skala laboratorium dengan sumber PV pada saat *on grid* dan PV-Diesel pada saat *off grid* di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, dengan beban berupa lampu menggunakan *software* HOMER. Dari hasil simulasi menggunakan HOMER didapatkan Pada sistem tenaga PV *microgrid* skala laboratorium PSSL saat on grid, biaya NPC akan selalu lebih tinggi (Rp.111.669.304,00) ketimbang sistem grid saat ini (Rp.108.440.360,00), perbedaannya sebesar Rp. 3.228.944,00 untuk 1 kali masa proyek (25 tahun). Sedangkan pada sistem tenaga *off grid* PV dan PV-Diesel *microgrid* skala laboratorium PSSL kombinasi sistem yang memiliki biaya paling efektif/optimal adalah sistem PV-Diesel dengan menggunakan PV 3,3 kW, diesel 1kW, 10 buah baterai, dan converter 2 kW. Dengan biaya COE Rp.3.825,00 dan NPC Rp.309.000.000,00

Kata Kunci: *Microgrid skala Laboratorium, Solar PV system, Simulasi HOMER*

***Optimization of PV and PV-Diesel Power System on
Laboratory-Scale Microgrid Operation in The Power
System Simulation Laboratory Sepuluh Nopember
Institute of Technology Using HOMER Software***

ABSTRACT

Jatridfa Jiwa Gandhi 2212100156

Consultive Lecturer I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Consultive Lecturer II : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Electrical energy needs are increasing and the depletion of fossil fuels, encouraging the appearance of many variations of generation sources. One example is the Solar Power Plant (PLTS). Solar power plants are power plants which convert solar energy into electrical energy. Application of this solar power is very broad, one of which is the use of solar power as a source of *microgrid* laboratory scale. In this final project will be simulated *microgrid* laboratory scale by PV source at the time on the grid and PV-Diesel at the time off the grid in Electric Power System Simulation Laboratory, Institute of Technology, with the burden of a lamp using HOMER software. From the simulation results obtained using HOMER In PV power systems laboratory scale *microgrid* PSSL time on the grid, the NPC will always be higher (Rp.111.669.304,00) than the current grid system (Rp.108.440.360,00), the difference amounting to Rp.3.228.944,00 for 1 project (25 years). Meanwhile, when the system is off grid the PV-Diesel system cost is lower than PV system, the components are 3.3 kW of PV , diesel 1kW, 11 batteries, and a 2 kW converter, with COE Rp.3.825,00 NPC is Rp. Rp.309.000.000,00.

Keywords: Laboratory-Scale Micro-grid; Solar PV Systems; HOMER simulation

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Optimisasi Sistem Tenaga PV dan PV-Diesel pada Operasi Microgrid Skala Laboratorium di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember Menggunakan *Software* Homer”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Mama saya Ita Rifiani Permatasari, Bapak saya Prija Djatmika dan kakak saya Jatrifia Ongga Sinatriya dan Jatrifia Ramadhani di Malang yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat kepada penulis baik dalam keadaan senang ataupun susah.
4. Bapak Dimas F. U. P ST. MT., beserta teman-teman asisten dan member lab PSSS B103 yang telah menciptakan dan memberikan dukungan, penjelasan, dan juga suasana kondusif dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Bapak Suyanto ST., MT. yang telah memberikan banyak bimbingan dan arahan sejak awal pengajuan tugas akhir ini sampai kini selesainya tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah berjasa selama empat tahun membantu penulis selama kuliah dan telah memberikan banyak ilmu yang bermanfaat..
7. Seluruh teman-teman e52, terima kasih atas cerita dan perhatiannya selama ini.
8. Teman-teman XLFL yang selalu menginspirasi.

9. Teman – teman ngalam yes yang selalu memberi semangat.
 10. Terakhir untuk Daniar, Hafis, Garuda, Eping, dan Mbak Hendita yang selalu mendukung dan mendoakan di Malang
- Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, Mei 2016
Penulis

TABLE OF CONTENT

ABSTRACT.....	vii
PREFACE	xi
TABLE OF CONTENT	Error! Bookmark not defined.
ILLUSTRATION.....	xvii
LIST OF TABLE	xix
LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS.....	xxi
BAB 1 INTRODUCTION	1
1.1. Background.....	1
1.2. Problem Statement.....	2
1.3. Objective.....	2
1.4. Problem Boundaries.....	2
1.5. Methodology.....	3
1.5.1. System Design.....	3
1.5.2. System Optimization and Simulation	4
1.5.3. System Analysis	4
1.6. Writing Structure	4
1.7. Relevance or Benefit.....	5
BAB 2 BASIC THEORY	7
2.1. <i>Microgrid</i>	7
2.1.1. <i>Microgrid Components</i>	7
2.2. <i>Photovoltaic</i>	8
2.2.1. Solar Cell.....	9
2.3. PV-Diesel Components.....	15
2.3.1. Diesel Generator.....	15
2.3.2. Bi-directional Converter.....	15
2.4. Emission	16

BAB 3	Designing PV and PV-Diesel System	17
3.1.	HOMER	17
3.2.	Site Layout	22
3.3.	Renewable Energy Resources	22
3.3.1.	Solar radiation and Clearness Index.....	22
3.3.2.	Wind Speed.....	24
3.4.	Load Profile in PSSL.....	25
3.5.	Component Sizing of Off Grid System	25
3.5.1.	Load	26
3.5.2.	PV Array Sizing.....	27
3.5.3.	Battery Sizing.....	30
3.5.4.	Converter and Inverter Sizing	32
BAB 4	SIMULASI, OPTIMISASI, DAN ANALISIS SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL.....	33
4.1.	<i>On Grid</i>	33
4.1.1.	Photovoltaic	34
4.1.2.	Battery.....	34
4.1.3.	Inverter.....	34
4.1.4.	Simulation of On Grid System.....	35
4.1.5.	Comparison with Grid System.....	38
4.2.	<i>Off Grid</i>	39
4.2.1.	Photovoltaic	40
4.2.2.	Diesel Generator	40
4.2.3.	Baterai.....	40
4.2.4.	Bi-directional Converter	41
4.2.5.	Inverter.....	41
4.2.6.	Simulation of Off Grid System	41
4.2.7.	Sensitivity Result	45
BAB 5	CLOSING.....	47
5.1.	Conclusions	47
5.2.	Suggestions.....	47
REFERENCES	49
INDEX	51

WRITER BIOGRAPHY	53
------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran Daya dari PV Ke Beban (Sumber:.NEED.org).....	10
Gambar 2.2 Inverter IR3000W di PSSSL ITS.....	12
Gambar 2.3 Generator diesel HONDA EU30IS	15
Gambar 3.1 <i>Flowchart software</i> HOMER.....	17
Gambar 3.2. Tampilan About HOMER.....	18
Gambar 3.3 Rata – rata radiasi matahari harian dan <i>clearness index</i> dari Kota Surabaya	23
Gambar 3.4 Rata – rata kecepatan angin Surabaya tiap bulan.....	24
Gambar 3.5 Rata – rata radiasi sinar matahari per hari di Surabaya (Sumber: www.bmkg.go.id).....	28
Gambar 4.1 Skematik Sistem On Grid	33
Gambar 4.2 Rata – rata produksi listrik tiap bulan	36
Gambar 4.3 Skematik sistem off grid	40
Gambar 4.4 Rata – rata produksi listrik tiap bulan	42
Gambar 4.5 Efek perubahan harga bensin terhadap NPC menggunakan HOMER	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Baterai Lead-acid dan Nickel Cadmium Tipe Baterai Lead-acid NiCd (Sumber : Battery University)	13
Tabel 2.2 Lama hari penyimpanan pada baterai.	14
Tabel 2.3 Daftar GWP	16
Tabel 3.1 Kelebihan dan kekurangan HOMER.	19
Tabel 3.2 Rincian Data Pemakaian Beban Lampu PSSL	25
Tabel 3.3 Perhitungan kebutuhan energi PSSL tiap hari	26
Tabel 3.4 Spesifikasi modul PV 50 WP Shinyoku Polycrystalline	27
Tabel 3.5 <i>Derating factor</i>	29
Tabel 3.6 Perhitungan daya keluaran PV	29
Tabel 3.7 <i>Days of storage</i>	30
Tabel 3.8 Perhitungan kapasitas baterai	31
Tabel 3.9 Jumlah baterai	31
Tabel 4.1 Simulasi dan optimasi HOMER	35
Tabel 4.2 Produk listrik tahunan sistem	36
Tabel 4.3 Cash flow sistem on grid	37
Tabel 4.4 Cash flow sistem on grid menggunakan persamaan ekonomi secara manual	38
Tabel 4.5 Biaya grid pada masa proyek	39
Tabel 4.6 Hasil Simulasi dan Optimasi sistem tenaga PV-Diesel dan PV pada HOMER	41
Tabel 4.7 Produksi listrik tahunan sistem off grid	43
Tabel 4.8 Cashflow sistem off grid HOMER	44
Tabel 4.9 Cashflow menggunakan persamaan ekonomi secara manual	44
Tabel 4.10 Cashflow dengan memperhitungkan <i>discount rate</i> dan <i>inflation rate</i>	45

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

PSSL	=	<i>Power System and Simulation Laboratory</i>
SCADA	=	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
HOMER	=	<i>Hybrid Optimization Model For Electric Renewables</i>
PCC	=	<i>Point of Common Coupling</i>
PV	=	<i>Photovoltaic</i>
LED	=	<i>Light Emitting Diode</i>
P-type	=	<i>Positive Type</i>
N-type	=	<i>Negative Type</i>
DC	=	<i>Direct Current</i>
DOD	=	<i>Depth of Discharge</i>
IC	=	<i>Initial Cost</i>
COE	=	<i>Cost of Energy</i>
OC	=	<i>Operation Cost</i>
$C_{tot,ann}$	=	<i>Total Annualized Cost</i>
C_{NPC}	=	<i>Total Net Present Cost</i>
$E_{non\ ren}$	=	<i>Total Produksi Listrik Non Renewable Energy</i>
$H_{non\ ren}$	=	<i>Total Produksi Listrik Non Termal</i>
$E_{grid,sales}$	=	<i>Total Energi Listrik yang di Jual pada Grid</i>
E_{served}	=	<i>Total Beban yang di suplai</i>
H_{served}	=	<i>Total Beban Termal yang di suplai</i>
O&M	=	<i>Operation and Maintenance</i>
NPC	=	<i>Net Present Cost</i>
R_{rem}	=	<i>Sisa Masa Hidup Komponen</i>
R_{rep}	=	<i>Durasi Biaya Penggantian Komponen</i>
C_{rep}	=	<i>Biaya Penggantian Componen</i>
R_{comp}	=	<i>Masa Hidup Komponen</i>
R_{proj}	=	<i>Masa Proyek</i>
CRF	=	<i>Capital Recovery Factor</i>
NASA	=	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NRAO	=	<i>Nominal Rated Array Output</i>
NiCd	=	<i>Baterai Nickel Cadmium</i>
Ah	=	<i>Ampere-hours</i>
WP	=	<i>Watt Peak</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat dan semakin menipisnya bahan bakar fosil, mendorong munculnya banyak variasi sumber pembangkit. Terlebih lagi, dikarenakan adanya desakan untuk menciptakan sumber pembangkit yang ramah lingkungan (*green technology*), menjadi salah satu faktor pendorong untuk mencari sumber energi lain selain bahan bakar fosil. Salah satu alternatif sumber pembangkit yang menjanjikan ialah *renewable energy* atau energi terbarukan. Energi terbarukan ialah energi yang berasal dari "proses alam yang berkelanjutan", seperti tenaga surya, tenaga angin, arus air proses biologi, dan panas bumi, yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber tenaga listrik.

Salah satu contoh pembangkit dengan konsep *renewable energy* ialah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Pembangkitan listrik dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara langsung menggunakan photovoltaic dan secara tidak langsung dengan pemusatan energi surya. Aplikasi dari PLTS ini sangatlah luas, salah satunya adalah pemanfaatan PLTS sebagai sumber dari *Microgrid* skala laboratorium.

Microgrid merupakan salah satu contoh pola pembangkitan terdistribusi yang melingkupi berbagai macam sumber energi, dari sumber energi fosil maupun sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yang memiliki sistem interkoneksi beban dan berbagai macam sumber yang terdistribusi. *Microgrid* juga dapat beroperasi secara paralel dengan sistem interkoneksi yang lebih besar atau beroperasi secara mandiri sehingga ketika terjadi gangguan pada *Microgrid*, kebutuhan energi listrik masih dapat terpenuhi dengan mengkoneksikan jaringan ke sistem utama, dalam hal ini adalah Perusahaan Listrik Negara (PLN).

Dalam Tugas Akhir ini akan di simulasikan *Microgrid* skala laboratorium dengan sumber PV pada saat *on grid* dan PV dan PV-Diesel pada saat *off grid* di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

(PSSL-ITS) dengan beban berupa lampu menggunakan *software* HOMER.

HOMER adalah suatu model micropower yang berfungsi untuk mensimulasi dan mengoptimasi, pada saat merancang sebuah sistem *Microgrid*. Dengan perangkat lunak ini, dapat diperoleh spesifikasi paling optimal dari sumber – sumber energi yang mungkin diterapkan dengan menggunakan biaya yang paling efektif (*cost-effective*)[4].

1.2. Permasalahan

Adapun fokus permasalahan yang terdapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Konsumsi dan biaya pemakaian listrik di PSSL ITS yang cukup tinggi memicu diadakannya penelitian terkait model sistem pembangkit listrik menggunakan energi terbarukan secara *on grid* yang rendah polusi dengan biaya operasi yang ekonomis dan efektif (*cost effective*) yang sesuai dengan kondisi di PSSL ITS.
2. PSSL ITS mempunyai harapan untuk dapat menyuplai bebannya sendiri tanpa perlu melakukan pembelian dari PLN (*grid*), maka dari itu penelitian terkait model sistem pembangkit listrik menggunakan energi terbarukan secara *off grid* perlu dilakukan.
3. Penggunaan *software* HOMER untuk melakukan simulasi dan optimasi *microgrid* dengan sumber energi terbarukan masih jarang ditemui dan diimplementasikan khususnya di Indonesia.

1.3. Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk mencari kombinasi terbaik antara PV dengan *grid* saat *on grid* dan PV dengan PV-Diesel saat *off grid*, agar mampu memenuhi kebutuhan listrik dari PSSL melalui suatu kombinasi yang menggunakan biaya yang ekonomis dan efektif (*cost effective*).

1.4. Batasan Tugas Akhir

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Beban yang digunakan untuk implementasi *Microgrid* pada (PSSL – ITS) ini hanya kebutuhan lampu nya saja.
2. Komponen pada simulasi sistem *on grid* disesuaikan dengan komponen yang dimiliki oleh PSSL
3. Komponen yang digunakan untuk simulasi *Microgrid* pada saat *off grid* dengan sistem PV adalah PV, inverter, generator diesel, dan baterai, *off grid* dengan sistem PV-Diesel adalah PV, converter, generator diesel, dan baterai sedangkan pada saat *on grid* adalah PV, inverter, baterai, dan *grid*. Hal ini disesuaikan dengan *software* HOMER.
4. Simulasi menggunakan *software* HOMER.

1.5. Metodologi

Metode yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap perancangan sistem, tahap simulasi dan optimasi sistem dan tahap analisis, adapun keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.5.1. Tahap Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data dan informasi yang dibutuhkan untuk tahap selanjutnya, adapun langkah – langkah dari tahap ini adalah:

1. Mencari informasi terkait wilayah (*site layout*) untuk menentukan apakah wilayah tersebut sudah tersambung dengan *grid* atau tidak. Informasi ini kemudian akan digunakan untuk mencari tahu biaya pembelian listrik *grid* atau biaya ekstensi transmisi *grid* ke wilayah tersebut.
2. Dapatkan informasi berupa data dari sumber daya energi terbarukan yang tersedia di lokasi yang kita inginkan (PSSL), sebagai contoh data mengenai nilai rata – rata energi matahari pada tiap bulannya, kecepatan angin dan tenaga diesel yang diperlukan untuk memasok beban. Tidak lupa juga mengumpulkan informasi terkait sumber dari *grid* (PLN).
3. Mencari data terkait kebutuhan beban lampu tiap harinya (*the daily load profile*) untuk PSSL.
4. Menentukan spesifikasi komponen dan estimasi biaya dari sistem tenaga PV dan PV-Diesel. Komponen tersebut ialah

PV *module*, generator diesel, baterai, inverter, converter, dan biaya pembelian dari grid.

5. Untuk tiap komponen tentukan nilai daya maksimum yang dihasilkan, *life time*, harga, periode penggantian dan perawatan komponen.

1.5.2. Tahap Simulasi dan Optimasi Sistem

Dalam tahap ini data dan informasi yang telah didapatkan sebelumnya akan di masukkan ke perangkat lunak HOMER. Kemudian HOMER akan melakukan proses simulasi dan optimasi untuk mendapatkan beberapa kombinasi antara PV secara *on grid* dan PV dan PV-Diesel secara *off grid* yang memiliki potensi untuk menjadi sistem dengan biaya paling efektif (*cost effective*).

1.5.3. Tahap Analisis

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi keluaran yang diberikan oleh HOMER. Tahap analisis dilakukan pada tiap kombinasi yang menurut penulis paling sesuai dengan kondisi PSSSL sekarang dan kedepannya. Hal ini berfungsi untuk mencari kombinasi yang tidak hanya *cost effective* namun juga berkelanjutan.

1.6. Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini dibagi menjadi lima bab. Adapun susunan laporan ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan tugas akhir.

BAB 2. DASAR TEORI

Bab ini berisi teori-teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini dan juga mengenai operasi dasar dari sistem tenaga PV dan PV-Diesel. Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir.

BAB 3. PERANCANGAN SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL PADA OPERASI *MICROGRID* SKALA LABORATORIUM DI LABORATORIUM SIMULASI SISTEM TENAGA INSTITUT TEKNOLOGI

SEPULUH NOPEMBER SURABAYA
MENGUNAKAN *SOFTWARE* HOMER

Bab ini berisikan tentang perancangan sistem tenaga PV dan PV-Diesel pada kondisi *on grid* dan *off grid*, yaitu penentuan lokasi, sumber daya yang tersedia di lokasi, dan spesifikasi komponen yang akan digunakan pada sistem.

BAB 4. SIMULASI, OPTIMASI, DAN ANALISIS SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL PADA OPERASI *MICROGRID* SKALA LABORATORIUM DI LABORATORIUM SIMULASI SISTEM TENAGA INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA MENGUNAKAN *SOFTWARE* HOMER DAN ANALISIS DATA

Bab ini berisi tentang analisa dari hasil simulasi dan optimasi oleh HOMER.

BAB 5. PENUTUP

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil eksperimen dan pengujian yang telah dilakukan.

1.7. Relevansi atau Manfaat

Diharapkan dengan adanya sistem tenaga PV dan PV-Diesel pada operasi *microgrid* skala laboratorium yang akan digunakan di (PSSL-ITS) dapat menjadi tolak ukur penggunaan *renewable energy* dan *microgrid* di ITS, serta dapat menginspirasi untuk penelitian selanjutnya yang lebih mendalam.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. *Microgrid*

Power grid merupakan seluruh peralatan kabel dan mesin yang menghubungkan sumber listrik (pembangkit listrik) dengan pelanggan. *Microgrid* merupakan sistem energi terintegrasi yang terdiri atas beban yang saling berhubungan dan sumber energi terdistribusi yang dapat terhubung dengan grid dan dapat dioperasikan sendiri (autonomously). Umumnya *microgrid* bekerja saat terhubung dengan grid, namun *microgrid* dapat terputus dengan grid dan bekerja dengan menghasilkan energi sendiri ketika saat – saat genting seperti badai atau saat grid sedang mati atau sebab lainnya.

Microgrid memiliki beberapa keuntungan, dari segi efisiensi, *microgrid* dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit, selain itu dapat mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh sistem distribusi karena letak pembangkit *microgrid* yang relatif dekat dengan beban. Dari segi keandalan, *microgrid* dapat mengatur secara optimal sumber energi selama 7 hari 24 jam. Selain itu, *microgrid* memiliki kemampuan untuk bekerja tanpa terhubung dengan grid. Dengan penggunaan *microgrid*, biaya listrik yang harus dibayar jadi lebih sedikit dan yang paling penting dapat mengurangi emisi karbon, karena pembangkit – pembangkit yang digunakan pada *microgrid* umumnya menggunakan energi terbarukan.

2.1.1. Komponen - Komponen *Microgrid*

Sistem *microgrid* umumnya terdiri dari komponen – komponen berikut :

1. Pembangkit Terdistribusi
Pembangkit yang digunakan pada *microgrid* umumnya lokasinya dekat dengan beban. Selain itu, pembangkit yang digunakan pada *microgrid* biasanya menggunakan energi alternatif, seperti tenaga surya, tenaga angin, biofuel dan biomass.
2. Beban

Beban yang terhubung pada *microgrid*, sama saja dengan powergrid biasa, namun biasanya dalam jumlah yang lebih sedikit.

3. Penyimpanan Sementara (baterai)
Penyimpanan sementara umumnya digunakan pada pembangkit – pembangkit *microgrid* yang tidak dapat bekerja selama 24 jam, seperti photovoltaic yang intensitas cahayanya tidak ada pada saat malam, atau turbin angin yang kecepatan anginnya fluktuatif.
4. Sistem Kontrol (Controller)
Sistem kontrol pada *microgrid* umumnya menggunakan SCADA. Sistem kontrol digunakan untuk sinkronisasi antara beban dan pembangkit, mengatur terhubung atau tidaknya dengan grid, serta melakukan prediksi dan analisis forecasting. Sistem kontrol yang digunakan harus cepat dan aman, karena digunakan untuk memonitor status sistem secara real time. Selain itu, respon sistem kontrol juga harus real time (sangat cepat)
5. Point of Common Coupling (PCC)
PCC merupakan titik dimana *microgrid* terhubung dengan grid.
6. Sistem Proteksi
Sistem proteksi digunakan untuk mengamankan sistem *microgrid* pada saat terjadi gangguan (misalnya ketika terjadi ketidakstabilan ketika *microgrid* dihubungkan ke pembangkit yang berbeda – beda).

2.2. Photovoltaic

Sistem pembangkit listrik jenis *photovoltaic* merupakan sistem yang mengubah energi matahari secara langsung dengan memanfaatkan elektron yang ada pada cahaya matahari untuk menghasilkan energi listrik. Photon yang ada pada cahaya matahari mengeksitasi elektron terluar agar lepas, dan ketika terhubung satu sama lain akan menghasilkan aliran elektron dan timbul arus listrik. Prinsip dasar *photovoltaic* merupakan kebalikan dari LED (*light emitting diode*) yang merubah energi listrik menjadi energi cahaya. Karakteristik *photovoltaic* yang ada sudah di tes dalam suatu kondisi standar (1000 W/m^2 dan 25°C) untuk menghasilkan daya yang sesuai dengan rating *photovoltaic* tersebut, apabila kita ingin menggunakan *photovoltaic* tersebut maka kita harus memperhitungkan pengaruh radiasi dan suhu pada karakteristik *photovoltaic* yang dimodelkan. Pengaruh intensitas

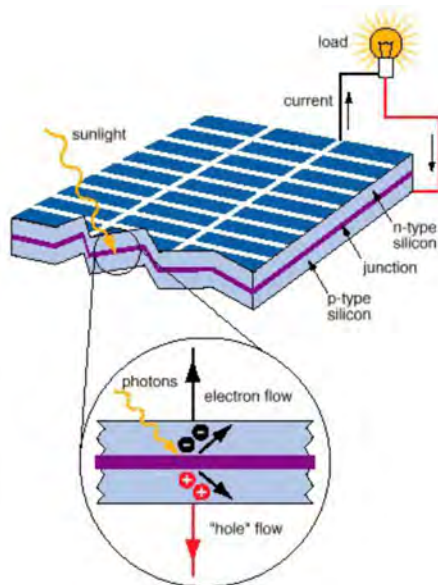
matahari dimodelkan dengan mempertimbangkan output daya dari modul *photovoltaic* yang akan sebanding dengan radiasinya. Modul *photovoltaic* diuji dalam keadaan STC (*standard test condition*). Adapun komponen – komponen dari PV akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

2.2.1. Sel Surya

Mekanisme konversi energi cahaya terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas di dalam suatu atom. Sel surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghantar elektroda bebas. Material semikonduktor adalah suatu padatan berupa logam, yang konduktivitas listriknya ditentukan oleh elektron valensinya. Material semikonduktor konduktivitasnya akan meningkat secara signifikan.

Saat foton dari sumber cahaya menumbuk suatu elektron valensi dari atom semikonduktor, akan mengakibatkan suatu energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron tersebut terlepas dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas tersebut bermuatan negatif menjadi bebas bergerak di dalam bidang Kristal dan berada pada daerah pita konduksi dari material semi konduktor. Hilangnya elektron mengakibatkan terbentuknya suatu kekosongan pada struktur kristal yang disebut dengan “hole” dengan muatan positif.

Daerah semikonduktor dengan elektron bebas dan bersifat negatif bertindak sebagai donor elektron. Daerah ini disebut negative type (n-type). Sedangkan daerah semikonduktor dengan hole, bersifat positif dan bertindak sebagai penerima (acceptor) elektron. Daerah ini disebut dengan positive type (p-type). Ikatan dari kedua sisi positif dan negatif menghasilkan energi listrik internal yang akan mendorong elektron bebas dan hole untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi sisi negatif, sedangkan hole bergerak menjauhi sisi positif. Ketika p-n junction ini dihubungkan dengan sebuah beban (lampu) maka akan tercipta sebuah arus listrik.



Gambar 2.1 Aliran Daya dari PV Ke Beban (Sumber: NEED.org)

Sedangkan untuk dapat menentukan ukuran dari sel surya, beberapa hal harus dipertimbangkan diantaranya adalah radiasi sinar matahari, kemiringan dari sel surya, dan karakteristik sel surya yang digunakan. Ukuran dari sel surya ditentukan untuk dapat memenuhi rata – rata permintaan beban harian untuk bulan ataupun musim yang memiliki rasio radiasi sinar matahari terendah.

Jika beban konstan maka, kita juga harus mempertimbangkan bulan yang memiliki lama sinar matahari per hari terendah (pada umumnya bulan desember dan januari). Hal ini dilakukan agar sel surya mampu memenuhi permintaan beban dikondisi apapun dan kapanpun. Setelah itu yang perlu kita ketahui untuk dapat menentukan sel surya adalah keluaran daya dari sel surya, radiasi sinar matahari, dan kebutuhan beban tiap harinya.

Untuk menentukan kebutuhan keluaran dari sel surya, total kebutuhan energi tiap hari dibagi dengan efisiensi *round trip* baterai untuk mengantisipasi terjadinya losses pada baterai.

$$\text{Kebutuhan keluaran array/hari} = \frac{\sum \text{Kebutuhan Energi/hari}}{\text{Efisiensi Round Trip}} \quad (2.1)$$

Kemudian, kita menentukan output dari modul PV yang kita pilih akan kita gunakan pada sistem dan dikalikan dengan 90% (+/- 10%) untuk mendapatkan besaran daya pasti yang dapat dihasilkan oleh modul PV tersebut.

$$\text{Keluaran Pasti PV} = \text{Keluaran PV} \times 0.9 \quad (2.2)$$

Faktor lain yang dapat mempengaruhi output dari modul PV adalah lama sinar matahari per hari dan *derating factor*, untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan pasokan daya. Maka ukuran PV disesuaikan dengan bulan yang memiliki rata – rata sinar matahari terendah tiap harinya dan dikali dengan *derating factor*.

$$\begin{aligned} \text{Energi Keluaran/modul/hari} = \\ \text{Keluaran PV Saat STC} \times \text{Radiasi Matahari} \times df \end{aligned} \quad (2.3)$$

Terakhir adalah menentukan jumlah modul yang dibutuhkan untuk dapat memenuhi beban harian yaitu dengan cara membagi kebutuhan keluaran dari sel surya dengan keluaran dari modul PV.

$$\text{Jumlah Modul PV} = \frac{\text{Kebutuhan keluaran array/hari}}{\text{Energi Keluaran/mod /hari}} \quad (2.4)$$

2.2.1.1. Inverter

Tegangan keluaran dari PV merupakan tegangan searah (tegangan DC) oleh karena itu, digunakan inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Tegangan input inverter (keluaran PV array) biasanya 12 V, 24 V atau 48 V, nilai tegangan ini menyesuaikan daya keluaran sistem PV. Efisiensi dari inverter ini sendiri biasanya berkisar antara 90 % hingga 96 % untuk beban penuh, dan 85 % hingga 95 % untuk beban 10%. Ketika ingin menentukan ukuran atau ingin menambah inverter yang dihubungkan pada PV harus memperhitungkan batas kemampuan dan efisiensi dari inverter. Kemampuan optimum sebuah sistem biasanya menggunakan inverter dengan rating antara 70% hingga 90% dari rating nominal PV yang digunakan, tergantung iklim dan karakteristik kerja inverter.



Gambar 2.2 Inverter IR3000W di PSSSL ITS

2.2.1.2. Baterai

Baterai merupakan komponen PV yang bersifat opsional, karena ada sistem PV yang tidak memerlukan baterai, seperti pompa air. Baterai digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh PV pada siang hari. Baterai memiliki banyak keuntungan, diantaranya sebagai berikut :

1. Baterai menyediakan sumber listrik yang portable. Tenaga listrik ini tersedia dan dalam jumlah yang besar untuk digunakan pada peralatan yang dapat dipindahkan atau ketika tidak ada jaringan listrik yang dapat diakses dan tidak bergantung dengan kabel.
2. Baterai dapat menyalurkan daya dalam jumlah yang sangat besar dalam waktu yang singkat dan dapat diisi ulang
3. Baterai menyediakan daya listrik di saat darurat (emergency power) saat penyedia daya utama sedang mati / perbaikan.
4. Baterai menyediakan daya DC murni untuk laboratorium dan keperluan – keperluan khusus.

Baterai yang dapat digunakan untuk sistem PV ada 2 jenis, baterai Lead-acid dan baterai Nickel Cadmium (NiCd), keduanya memiliki kekurangan dan kelebihan masing – masing. Baterai Leadacid

lebih sering digunakan daripada baterai Nickel Cadmium. Ada 6 faktor yang harus digunakan dalam pemilihan baterai PV :

1. Low Cost (biaya yang murah)
Biaya terbagi menjadi biaya awal (pembelian) dan biaya tahunan (biaya operasi dan perbaikan). Biaya awal merupakan biaya pasti selama masa perencanaan hingga saat membeli baterai, biaya operasi dan perbaikan tidak perlu dimasukkan di biaya awal. Tapi biaya ini dimasukkan ke perhitungan biaya tahunan. Lifetime baterai mempengaruhi biaya keseluruhan. Apabila baterai bertahan kurang dari 3,5 tahun, maka akan memakan banyak biaya untuk penggantian baterai.
2. Efisiensi Energi yang Tinggi
Kinerja baterai tidak ideal, pasti ada rugi – rugi energi selama charging (pengisian), discharging, dan self discharging selama baterai tidak digunakan. Efisiensi energi dihitung sebagai perbandingan antara energi pengisian dan energi discharging. Self discharging sendiri tergantung pada rugi-rugi bocor internal dari baterai dan rugi-rugi eksternal yang diakibatkan konsumsi energi komponen - komponen elektronik. Self discharge akan meningkat dengan meningkatnya suhu, sehingga untuk mengurangi self discharge pada baterai, baterai harus disimpan pada suhu yang lebih rendah
3. Waktu Pemakaian yang lama
4. Perbaikan seminim mungkin dan konstruksi yang kuat
5. Handal dan self discharge yang kecil
6. Range suhu operasi yang luas

Pada tugas akhir ini dipilih baterai lead-acid Luminous 12V, 200Ah.

Tabel 2.1 Perbedaan Baterai Lead-acid dan Nickel Cadmium Tipe Baterai Lead-acid NiCd (Sumber : Battery University)

Tipe Baterai	Lead-acid	NiCd
Waktu Siklus	600 – 1500 siklus	1500 – 3500 siklus
Efisiensi	83% - 90%	71%
<i>Self Discharge Rate</i>	3-10% perbulan	6-20% perbulan
Temperatur Operasi	-15° hingga 50°	-40° hingga 45°

Untuk menentukan ukuran baterai pertama – tama kita harus mencari jumlah baterai saat paralel untuk itu kita harus mengetahui kebutuhan arus beban tiap harinya (Ah/day), lama hari penyimpanan baterai tanpa adanya sinar matahari yang diinginkan (tabel 2.2), *depth of discharge* (DOD) baterai, kapasitas Ah baterai yang dipilih, tegangan bus baterai dan tegangan baterai.

Tabel 2.2 Lama hari penyimpanan pada baterai.

Garis lintang lokasi pemasangan	Waktu cadangan (t_{rec})
0°-30° (Utara atau Selatan)	5-6 hari
30°-50° (Utara atau Selatan)	10-12 hari
50°-60° (Utara atau Selatan)	15 hari

Sumber : Solarex,1996 : *Discover The Newest World Power, Frederick Court, Maryland, USA.*

Number of batteries in parallel:

$$\frac{\text{Total} \frac{\text{Ah}}{\text{day}} \times \text{Lama Waktu Penyimpanan}}{\text{depth of discharge} \times \text{Kapasitas Ah Baterai}} \quad (2.5)$$

Kemudian untuk menentukan jumlah baterai yang dibutuhkan untuk menyediakan kebutuhan tengangan dc pada sistem atau jumlah baterai pada rangkaian seri adalah membagi tegangan bus baterai dengan tegangan baterai.

$$\frac{\text{Tegangan Bus Baterai}}{\text{Tegangan Baterai}} \quad (2.6)$$

Sehingga untuk mendapatkan jumlah baterai total yang dibutuhkan oleh sistem ialah dengan mengkalikan jumlah baterai saat paralel dengan seri.

2.3. Komponen PV-Diesel

Komponen yang digunakan untuk sistem PV-Diesel tidak jauh berbeda dengan sistem PV. Namun, ada tambahan komponen lain yaitu converter, sebagai pengganti inverter, dan diesel.

2.3.1. Diesel generator

Secara umum fungsi *diesel generator* adalah untuk mensuplai arus pada sistem kelistrikan. Proses pembangkitan listrik pada generator menggunakan prinsip induksi yaitu apabila terjadi perpotongan medan magnet dengan penghantar, maka pada penghantar akan timbul gaya gerak listrik. Untuk mendukung *green energy* generator diesel biasanya hanya digunakan untuk *back up* pada sistem [6]. Ukuran generator dapat disesuaikan sesuai dengan tugasnya, generator bisa di *size* hanya untuk mengisi baterai, atau dapat dipilih ukuran yang cukup besar agar mampu untuk mengisi baterai dan secara bersamaan menjalankan beban secara keseluruhan. Untuk tugas akhir ini, generator di *sizing* hanya untuk mengisi baterai dan mensuplai sebagian kecil dari beban.



Gambar 2.3 Generator diesel HONDA EU30IS

2.3.2. Bi-directional Converter

Ketika generator termasuk komponen dalam sistem, salah satu komponen harus mampu mengkonversi DC dari baterai ke AC untuk mensuplai beban, serta mengkonversi AC dari generator ke DC untuk mengisi baterai. Komponen tersebut ialah bi-directional converter. Bi-

directional converter adalah kombinasi dari rectifier dan inverter. Converter dapat beroperasi sebagai *battery charger* saat mendapatkan daya dari diesel atau membagi beban dengan diesel itu sendiri [5].

2.4. Emisi

Emisi adalah zat, energi atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk atau dimasukkannya ke dalam udara yang mempunyai atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar. Namun, dikarenakan kita menggunakan generator diesel maka kita harus menghitung potensi emisi CO₂ yang dapat dihasilkan oleh generator tersebut untuk mengetahui dampak penggunaan generator diesel terhadap lingkungan.

$$Emisi\ CO_2\ \left(\frac{kg}{yr}\right) = Jumlah\ BBM\ (L) \times Faktor\ konversi \times GWP \quad (2.1)$$

Faktor konversi dari bensin adalah 2.6413 kg/liter dengan GWP (Global Warning Potential) dari CO₂ dapat dilihat pada tabel berikut

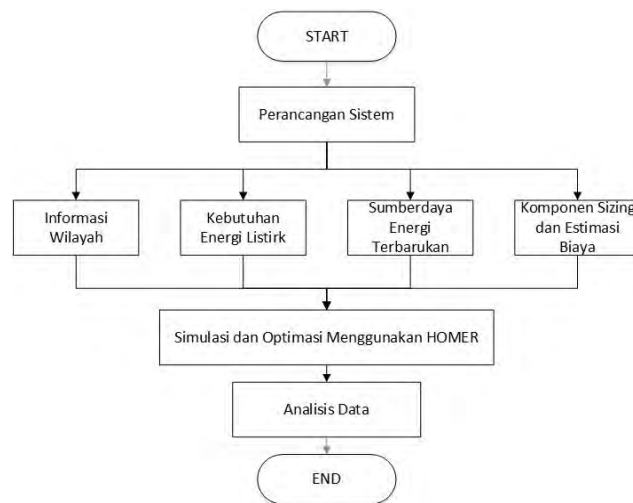
Tabel 2.3 Daftar GWP

Senyawa	Rumus Kimia	GWP
Karbon Dioksida	CO ₂	1
Methane	CH ₄	21
Nitrous Oxide	N ₂ O	310
Perfluoroethane	C ₂ F ₆	9.200
Perfluoropentane	C ₅ F ₁₂	7.500
Perfluorohexane	C ₆ F ₁₄	7.400
Sulphur Hexafluoride	SF ₆	23.900

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM TENAGA PV DAN PV- DIESEL

3.1. HOMER

Tugas akhir ini menggunakan perangkat lunak HOMER untuk mendesain sistem *microgrid*. Sebelum melakukan simulasi dan optimasi menggunakan HOMER, kita perlu mengumpulkan informasi terkait beban laboratorium, tata letak lokasi, sumber daya yang tersedia di laboratorium dan ukuran komponen yang akan digunakan pada sistem *microgrid* skala laboratorium terlebih dahulu, agar menghasilkan keluaran yang optimal dan *cost effective* [2]. Hal tersebut dapat kita lihat pada Gambar 3.1. Perlu diingat bahwa HOMER akan selalu memilih ukuran komponen yang dapat memenuhi kebutuhan sistem dan memiliki harga pembangkitan listrik dan total biaya NPC yang paling rendah.



Gambar 3.1 Flowchart software HOMER

HOMER (The Hybrid Optimization Model for Energy Renewable) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk operasi model sistem tenaga listrik skala kecil (micropower) dengan menggunakan berbagai pilihan sumber daya terbarukan maupun

sumber energi konvensional. Dengan perangkat lunak ini, dapat diperoleh spesifikasi paling optimal dari sumber – sumber energi yang mungkin diterapkan. Perangkat lunak ini melakukan perhitungan keseimbangan energi untuk setiap konfigurasi sistem yang akan dipertimbangkan. Kemudian menentukan konfigurasi yang layak, apakah dapat memenuhi kebutuhan listrik pada lokasi yang ditentukan, perkiraan biaya modal, penggantian, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar dan bunga. Misalnya pada sistem *microgrid* dengan menggunakan PV (photovoltaic), maka Kita harus memasukkan data load / beban, data sumber daya matahari, data ekonomi, data constraints, system control inputs.



Gambar 3.2. Tampilan About HOMER

Kelebihan perangkat lunak ini, selain penggunaannya mudah, bisa mensimulasi, mengoptimasi dan kemudian secara otomatis dapat menemukan konfigurasi sistem optimum yang bisa menyuplai beban

dengan biaya sekarang (NPC) terendah, dan bisa menggunakan parameter sensitivitas untuk hasil yang lebih bagus dan akurat. Tabel 3.1 menjelaskan tentang kelebihan dan kelemahan HOMER [5].

Tabel 3.1 Kelebihan dan kekurangan HOMER.

HOMER	
Kelebihan	Membantu untuk menentukan bagaimana sumber daya terbarukan seperti angin dan matahari dapat secara optimal diintegrasikan ke dalam sistem hybrid.
	Menentukan kelayakan ekonomi dari sistem energi terbarukan, mengoptimalkan desain sistem dan memungkinkan pengguna untuk benar-benar memahami bagaimana sistem energi terbarukan bekerja
	Menyajikan pilihan mengenai utilitas, telekomunikasi, sistem integrator, dan jenis lain dari pengembangan proyek sehingga mengurangi risiko kekurangan dana pada proyek pembangkit listrik energi terbarukan
Kelemahan	Tidak memberikan jumlah panel dan jenis PV sebagai solusi, hanya ditampilkan dalam bentuk daya PV array.
	Pengguna harus memilih jenis baterai sendiri dan tidak ada optimasi antara berbagai jenis baterai yang dipilih

Terdapat beberapa kosakata baru yang berkaitan dengan hasil simulasi pada HOMER, berikut akan dijelaskan pengertian dari kosakata baru yang akan sering dijumpai pada HOMER, diantaranya adalah :

1. Initial Capital (Rp)

Adalah sebutan untuk total biaya awal yang dikeluarkan untuk pembelian komponen dan instalasi awal pembangunan proyek dengan kata lain dapat disebutkan bahwa initial capital adalah modal awal yang dikeluarkan untuk membangun sebuah proyek baru. Homer mempersamakan dengan menjumlahkan semua biaya komponen yang digunakan pada masing-masing Tab “Initial Capital” saat inputkan data.

2. Total NPC (Rp)

Adalah singkatan dari *Net Present Cost* dimana nilai ini adalah biaya bersih yang dikeluarkan selama proyek beroperasi yang meliputi dari semua biaya instalasi dan

operasi komponen dikurangi nilai dari semua pendapatan yang dihasilkan.

3. Operating Cost (Rp/yr)

Adalah biaya pengoperasian proyek yang dikeluarkan rutin setiap tahunnya yang meliputi semua biaya termasuk penghasilan dari proyek selain initial capital atau biaya modal awal.

$$C_{operating} = C_{tot,ann} - C_{ann,cap} \quad (3.1)$$

$C_{tot,ann}$ atau total annualized Cost adalah biaya yang dikeluarkan rutin setiap tahunnya yang berlangsung selama proyek beroperasi, homer juga telah memberikan persamaan tersendiri untuk mendapatkan nilai dari annualized cost ini seperti yang terlihat pada persamaan 3.2., sedangkan Annualized Capital Cost adalah nilai keseluruhan dari Initial Capital yang dikalikan dengan nilai Capital Recovery Factor.

$$C_{tot,ann} = CRF(i, N) \times C_{NPC} \quad (3.2)$$

CRF adalah fungsi untuk menghitung nilai *Capital Recovery Factor*, i adalah *annual discount rate*, N adalah lama proyek berlangsung, dan terakhir C_{npc} adalah total *Net Present Cost*. Adapun persamaan CRF dapat kita lihat pada persamaan 3.3

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{i(1+i)^N - 1} \quad (3.3)$$

4. Cost Of Energy (Rp/kWh)

Cost of energy adalah biaya rata-rata per kWh yang diproduksi oleh sistem yang disuplai ke beban. Untuk menghitungnya HOMER membagi biaya pertahun selama memproduksi listrik dikurangi biaya untuk melayani beban termal yang ada pada beban elektrik.

$$COE = \frac{C_{tot,ann}}{E_{tot,ann,served}} \quad (3.3)$$

Ctot,ann atau total annualized Cost adalah biaya yang dikeluarkan rutin setiap tahunnya yang berlangsung selama proyek beroperasi. Ctot,ann memperhitungkan biaya modal tahunan, biaya penggantian tahunan, operasi tahunan dan pemeliharaan (O & M) biaya, biaya bahan bakar tahunan (jika ada) dari komponen sistem

5. Renewable Fraction

Renewable Fraction merupakan perbandingan antara energi yang disalurkan ke beban yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan.

$$fren = 1 - \frac{(E_{non\ ren} - E_{grid,sales}) + H_{non\ ren}}{E_{served} - H_{served}} \quad (3.4)$$

Enon ren (kWh/tahun) adalah produksi yang non energi terbarukan, Egrid sales (kWh/tahun) adalah energi terjual ke grid, Hnon ren adalah produksi termal non energi terbarukan, Eserved (kWh/tahun) adalah total beban yang dilayani dan Hserved (kWh/tahun) adalah total beban termal yang dilayani.

6. Salvage

Salvage adalah biaya dari komponen yang masih memiliki harga jual pada saat masa proyek berakhir. HOMER mengkalkulasi biaya salvage menggunakan persamaan berikut.

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (3.5)$$

R_{rem} , merupakan masa hidup dari komponen yang masih tersisa saat masa proyek berakhir.

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad (3.6)$$

R_{rep} , merupakan durasi biaya penggantian komponen.

$$R_{rep} = R_{comp} \times INT \left(\frac{R_{proj}}{R_{comp}} \right) \quad (3.7)$$

Crep adalah biaya penggantian komponen, Rcomp adalah masa hidup komponen, Rproj adalah masa proyek, dan INT () adalah fungsi untuk mendapatkan *integer real number* ($\text{INT}(6.843) = 6$).

3.2. Informasi Wilayah

Situasi dan kondisi kota Surabaya patut untuk diketahui untuk dapat menentukan potensi yang dapat mendukung implementasi *Microgrid* di Power System Simulation Laboratory Institut Teknologi Sepuluh Nopember (PSSL - ITS). Berikut akan dijelaskan secara umum tentang kota Surabaya yang berkaitan dengan letak geografis dan potensi sumber energi terbarukan yang tersedia di kota Surabaya.

Kota Surabaya merupakan kota terbesar kedua di Indonesia setelah Jakarta yang berada di provinsi Jawa Timur. Kota ini terletak 796 km sebelah timur Jakarta atau 415 km sebelah barat laut Denpasar, Bali. Surabaya terletak di tepi pantai utara pulau Jawa dan berhadapan dengan Selat Madura serta Laut Jawa. Surabaya memiliki luas daratan sekitar 333,063 km² serta lautan seluas 190,39 km² dengan penduduknya berjumlah 2.909.257 jiwa yang tercatat pada tahun 2015 ini. Secara geografis Surabaya berada pada 07°09'00" – 07°21'00" Lintang Selatan dan 112°36' – 112°54' Bujur timur Atau berada pada Latitude dan Longitude -7.2653°S ; 112,7425°E.

3.3. Ketersediaan Sumber Daya Energi Terbarukan

Sebelum menentukan sumber energi terbarukan jenis apa yang akan digunakan tentunya harus diketahui secara baik potensi energi terbarukan yang ada di Surabaya, berikut akan dijabarkan potensi akan sumber energi terbarukan yang berasal dari radiasi sinar matahari dan kecepatan angin.

3.3.1. Radiasi Sinar Matahari dan *Clearness Index*

Kota Surabaya memiliki potensi radiasi sinar matahari yang sangat tinggi karena letaknya yang berada di dataran rendah dan dekat dengan pesisir pantai. Sehingga diperkirakan potensi radiasi sinar matahari yang dihasilkan akan berpeluang besar untuk dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan pada *Microgrid* yang akan di

implementasikan pada PSSSL - ITS. Berikut merupakan data yang diambil pada tanggal 22 Maret 2016 dari salah satu website milik NASA (National Aeronautics and Space Administration) yang merangkum keadaan atmosfer di dunia yang diperlihatkan pada gambar di bawah, di mana ditunjukkan potensi radiasi matahari dalam satuan Kilowatt (Kw) perhari nya yang dihasilkan dalam setiap 1 meter persegi (m²) Photo Voltaic (PV) yang digunakan. Untuk mendapatkan data tersebut diperlukan letak koordinat lokasi kota Surabaya yang meliputi Latitude dan Longitude nya.

Hasil pengamatan pengukuran potensi radiasi matahari yang telah dirangkum oleh NASA menjadikan acuan bagi seluruh pengguna PV untuk mengatur seberapa besar beban elektrik yang akan digunakan dan seberapa banyak PV dalam setiap 1 m² yang akan digunakan untuk melayani beban elektrik yang diinginkan dengan kapasitas radiasi matahari yang alami dihasilkan oleh alam setiap kWh/m²/day.

Tak lupa juga data mengenai *clearness index* di Surabaya kita ambil dari webstie yang sama (NASA) untuk keperluan simulasi menggunakan HOMER. *Clearness index* adalah nilai dari radiasi matahari global yang berada pada permukaan tanah dibagi dengan radiasi matahari di luar angkasa yang berada di atas atmosfer. Dalam kata lain, *clearness index* merupakan proporsi dari radiasi matahari di luar angkasa yang berhasil sampai ke permukaan bumi. Nilai rata – rata tiap bulannya dari *clearness index*, berikisar dari 0.2 hingga 0.8.



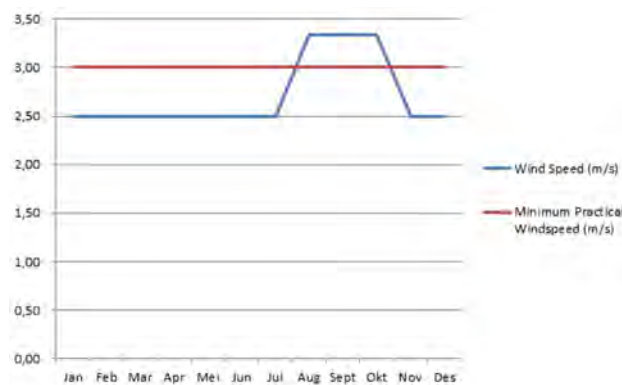
Gambar 3.3 Rata – rata radiasi matahari harian dan *clearness index* dari Kota Surabaya

Dari tabel di atas terlihat bahwa radiasi matahari bernilai tinggi pada saat bulan agustus hingga november. Untuk keperluan PV dan PV-

diesel pada penelitian ini didapatkan nilai rata -rata dari *clearness index* sebesar 0.54 dan rata – rata radiasi matahari harian sebesar 5.17 kWh/m²/day.

3.3.2. Kecepatan Angin

Surabaya dapat dikategorikan sebagai daerah yang kurang berpotensi akan sumber energi terbarukan yang mengandalkan kecepatan angin. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rata – rata kecepatan angin Surabaya tiap bulan.

Dalam prakteknya, rentang kecepatan angin yang sesuai untuk kinerja yang baik pada *Wind Turbine* adalah antara 3 m/s – 5 m/s dan semakin tidak disarankan ketika kecepatan angin berkurang dari nilai tersebut [5]. Sehingga dapat disimpulkan bahwa potensi kecepatan angin di kota Surabaya memiliki hembusan angin di bawah standar operasi *Wind Turbine* sehingga kurang berpotensi untuk digunakan sebagai sumber energi terbarukan pada implementasi *Microgrid* skala laboratorium.

Maka dari itu, secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa dari data pengamatan potensi radiasi sinar matahari dan kecepatan angin yang dirangkum oleh NASA. Potensi yang sangat memungkinkan untuk digunakan pada implementasi *Microgrid* pada (PSSL – ITS) adalah dengan menggunakan sumber energi radiasi sinar matahari, selain biaya

perawatan yang minim juga tidak membutuhkan lahan yang luas untuk membangun PV.

3.4. Kebutuhan Energi Listrik di PSSSL

Pada dasarnya kebutuhan energi listrik di (PSSSL – ITS) ini sangat banyak sekali mencakup dari : lampu, AC, Kulkas, Komputer, Printer, LCD dan Kebutuhan untuk praktikum lainnya. Namun implementasi *Microgrid* pada (PSSSL – ITS) ini hanya dibatasi untuk kebutuhan lampu nya saja.

Total ada 40 lampu dengan daya masing – masing sebesar 16 watt di PSSSL ITS. 20 lampu beroperasi selama 12 jam/hari dan 20 lampu sisanya beroperasi selama 24 jam/hari. Lampu diperkirakan memiliki jumlah nilai faktor daya dan ballast senilai 0,909. Berikut adalah rincian data pemakaian beban lampu di (PSSSL – ITS) yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.2 Rincian Data Pemakaian Beban Lampu PSSSL

Waktu	Beban (kW)	Waktu	Beban (kW)
00:00 – 01:00	0,32	12:00 – 13:00	0,64
01:00 – 02:00	0,32	13:00 – 14:00	0,64
02:00 – 03:00	0,32	14:00 – 15:00	0,64
03:00 – 04:00	0,32	15:00 – 16:00	0,64
04:00 – 05:00	0,32	16:00 – 17:00	0,64
05:00 – 06:00	0,32	17:00 – 18:00	0,64
06:00 – 07:00	0,32	18:00 – 19:00	0,64
07:00 – 08:00	0,64	19:00 – 20:00	0,32
08:00 – 09:00	0,64	20:00 – 21:00	0,32
09:00 – 10:00	0,64	21:00 – 22:00	0,32
10:00 – 11:00	0,64	22:00 – 23:00	0,32
11:00 – 12:00	0,64	23:00 – 00:00	0,32

3.5. Sizing Komponen sistem *off grid* dan Estimasi Biaya

PSSSL berkeinginan untuk dapat menyuplai bebannya secara mandiri tanpa melakukan pembelian daya pada *grid*. Agar dapat melakukan hal tersebut kita harus melakukan *sizing* komponen terlebih dahulu untuk mendapatkan ukuran komponen terbaik untuk PSSSL. Nantinya semua komponen dijadikan input pada perangkat lunak HOMER. HOMER kemudian yang akan menentukan mana yang paling sesuai untuk diimplementasikan pada sistem *microgrid* skala

laboratorium, untuk perbandingan sistem *microgrid off grid* akan di modelkan dengan 2 sistem yang berbeda yaitu sistem yang disuplai oleh PV saja dan PV-diesel (*hybrid*). Masa proyek dipilih selama 25 tahun.

3.5.1. Load

Sebelum menentukan ukuran tiap komponen yang diperlukan pada sistem, pertama – tama kita harus mengkonversi besaran beban dalam Wh/day dan Ah. Pada tugas akhir ini diasumsikan efisiensi inverter sebesar 0,85 dan tegangan bus baterai sebesar 24 volt (mengikuti besar input tegangan dc pada inverter). Beban yang akan disuplai oleh sistem adalah 20 lampu (masing – masing 16 watt) beroperasi selama 24 jam/hari dan 20 lampu (masing – masing 16 watt) beroperasi selama 12 jam/hari.

Tiap beban kemudian dibagi dengan efisiensi inverter untuk menentukan besaran daya aktual yang diambil dari baterai (*adjusted wattage*) dan dikalikan dengan dengan lama waktu beroperasi untuk menentukan energi tiap hari.

Tabel 3.3 Perhitungan kebutuhan energi PSSSL tiap hari

Beban	Perhitungan	Energy per Hari (Wh/hari)
20 lampu (@16 watt), 12 jam	$\frac{20 \times 16 \times 12}{0.85}$	4.517,64
20 lampu (@16 watt), 24 jam	$\frac{20 \times 16 \times 24}{0.85}$	9.035,29
Total		13.552,93

Sehingga total kebutuhan energi tiap harinya sebesar 13.552,93 Wh/day. Kemudian kita harus menentukan kebutuhan *ampere-hours* (Ah) per hari untuk sizing baterai dengan cara membagi kebutuhan energi tiap harinya dibagi dengan tegangan bus :

$$Ah/day = \frac{\sum \text{Kebutuhan Energi/hari}}{\text{Tegangan Bus}}$$

$$13.552,93 / 24 = 563,455 \text{ Ah/day}$$

3.5.2. Menentukan Kapasitas PV Array

Pada sub-bab sebelumnya diketahui bahwa total kebutuhan energi PSSL tiap hari ialah sebesar 13.552,93 Wh/day. Menggunakan persamaan 2.1 pada bab sebelumnya untuk dapat menentukan keluaran dari PV array. Pada tugas akhir ini efisiensi *round trip* baterai kita asumsikan sebesar 0,85 dan kemudian akan kita jadikan input pada HOMER.

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Energi/hari} &= \frac{\sum \text{Kebutuhan Energi/hari}}{\text{Efisiensi Round Trip}} \\ &= \frac{13552,39}{0,85} \\ &= 15.943,98 \text{ Wh/day} \end{aligned}$$

Kemudian, kita menentukan output dari modul PV yang kita pilih akan kita gunakan pada sistem. PV yang akan dipakai pada tugas akhir ini adalah modul PV 50 WP Shinyoku Polycrystalline dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Spesifikasi modul PV 50 WP Shinyoku Polycrystalline

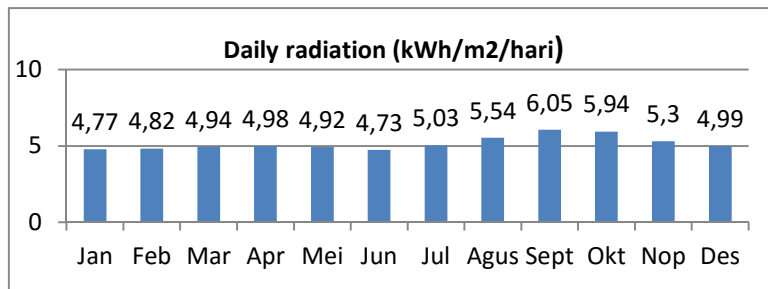
Model	50 WP Shinyoku Polycrystalline
Power (typical +/- 10%)	50.0 Watt
Current (typical at load)	3,34 Amps
Voltage (typical at load)	16,5 Volts
Short Circuit Current (typical)	4,23 Amps
Open Circuit Voltage (typical)	21,1 Volts
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	47 derajat Celcius

Dari Tabel 3.4 dapat kita lihat bahwa output dari modul PV adalah sebesar 50 watt, namun seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya keluaran PV dapat berkurang secara signifikan ketika terjadi perubahan temperature (efek temperature). Maka dari itu kita harus memperhitungkan temperatur di bulan yang memiliki radiasi matahari terendah (januari) saat menentukan ukuran PV.

$$\begin{aligned}
 PV \text{ module guaranteed Output} &= PV \text{ Power Output} \times 0.9 \\
 &= 50 \times 0.9 \\
 &= 45 \text{ Watts}
 \end{aligned}$$

Faktor lain yang dapat mempengaruhi output dari modul PV adalah radiasi matahari per hari dan *derating factor*, untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan pasokan daya. Maka ukuran PV disesuaikan dengan bulan yang memiliki rata – rata radiasi sinar matahari terendah tiap harinya. Dari Tabel dibawah dapat dilihat bahwa bulan januari memiliki rata – rata radiasi sinar matahari terendah yaitu 4,77 kWh/m²/hari, sehingga menggunakan persamaan 2.3 maka didapatkan :

$$\begin{aligned}
 \text{Keluaran Energi/modul/hari} &= P \times \text{Radiasi Matahari} \\
 &= 45 \times 4,77 \\
 &= 214,65 \text{ Wh/hari}
 \end{aligned}$$



Gambar 3.5 Radiasi sinar matahari/hari di Surabaya (bmkg.go.id)

Sedangkan untuk *derating factor*, dapat kita lihat pada tabel 3.5. Dikarenakan input dari HOMER bukanlah jumlah modul PV melainkan berupa *nominal rated array output*, maka jumlah modul PV harus dikalikan dengan *rated output* PV yaitu 50 watt. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.5.

NOCT dari panel yang kita pilih ialah 47 derajat Celcius, kemudian masukkan kondisi PTC (PVUSA Test Condition) yaitu *ambient temperature* 20°C insulasi (S) 1 kW/m². Suhu maksimal Kota Surabaya pada bulan januari ialah 35°C. Maka temperature sel surya saat S = 1 kW/m², adalah:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}}{0.8} \right) \times S = 35 + \left(\frac{27}{0.8} \right) \times 1$$

$$= 68,75^{\circ}$$

Dengan *losses* daya 0.5% tiap derajat diatas suhu $25^{\circ}C$ maka daya keluaran dari PV adalah :

$$P(PTC) = 50 \text{ W} \times (1 - 0.005 \times (68,75 - 25)) = 39,06 \text{ Watt}$$

Ini berarti saat suhu surabaya $35^{\circ}C$ maka keluaran daya dari PV hanya sebesar 39,06 watt atau hanya sebesar 78% dari keluaran PV semestinya atau dalam kata lain *derating factor* akibat temperature adalah 78%.

Tabel 3.5 Derating factor

Losses akibat temperature	22%	78%
Losses ketika sinar matahari tidak langsung mengenai panel	5%	95%
Losses ketika tidak mendapatkan nilai MPPT	10%	90%
Losses akibat debu	5%	95%
Losses akibat umur alat (ageing)	10%	90%
		57%

Tabel 3.6 Perhitungan daya keluaran PV

Output PV (Wh/hari)	Jumlah Modul PV	Nominal Rated Array Output (W)
$214,65 \times 0.57 = 122,35$	$\frac{15.943,98}{122,35} = 131$	$131 \times 50 = 6550$

Dari hasil perhitungan pada Tabel di atas dapat terlihat bahwa besaran nilai *Nominal Rated Array Output* (NRAO) adalah 5900 Watt. Perlu diketahui bahwa HOMER belum tentu memutuskan bahwa nilai tersebut merupakan nilai yang paling sesuai untuk sistem. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, HOMER selalu memilih komponen yang dapat memenuhi kebutuhan sistem dan memiliki harga pembangkitan listrik yang paling rendah. Perlu diingat bahwa HOMER memiliki algoritma tersendiri, sehingga HOMER mampu menentukan nilai NRAO yang paling sesuai dari beragam *size* yang nanti akan kita masukkan.

Maka dari itu kita perlu untuk memberikan nilai NRAO lain untuk dijadikan pertimbangan oleh HOMER (umumnya kelipatan dari kapasitas PV yang kita pilih). Sehingga nilai NRAO yang akan digunakan sebagai input HOMER adalah 0, 4950, 5850, 5900, 5950, 6000, 6050, 6100, 6500, dan 6550.

3.5.3. Menentukan Kapasitas Baterai

Pada tugas akhir ini *allowable depth of discharge* (DoD) diasumsikan sebesar 0.8. Sedangkan untuk lama penyimpanan baterai atau *days of storage*, ditentukan berdasarkan gambar berikut.

Tabel 3.7 *Days of storage*.

Garis lintang lokasi pemasangan	Waktu cadangan (t_{rec})
0°-30° (Utara atau Selatan)	5-6 hari
30°-50° (Utara atau Selatan)	10-12 hari
50°-60° (Utara atau Selatan)	15 hari

Sumber : Solarex, 1996 : *Discover The Newest World Power*, Frederick Court, Maryland, USA.

Dikarenakan Indonesia terletak di 6° LU - 11° LS, maka lama penyimpanan yang dipilih adalah 5, 6, dan 7 hari, 7 hari dipilih karena alasan keamanan. Namun, 3 hari juga dipilih untuk alasan perbandingan [7]. Untuk menentukan jumlah baterai pada saat paralel dan seri kita menggunakan persamaan 2.5 dan 2.6

Number of batteries in paralel:

$$\frac{\text{Total} \frac{Ah}{\text{day}} \times \text{Lama Waktu Penyimpanan}}{\text{depth of discharge} \times \text{Kapasitas Ah Baterai}}$$

Kemudian untuk menentukan jumlah baterai yang dibutuhkan untuk menyediakan kebutuhan tegangan dc pada sistem atau jumlah baterai pada rangkaian seri adalah membagi tegangan bus baterai dengan tegangan baterai.

Number of batteries in series:

$$\frac{\text{Tegangan Bus Baterai}}{\text{Tegangan Baterai}}$$

Hasil dari perhitungan tersebut dapat di lihat pada Tabel berikut.

Tabel 3.8 Perhitungan kapasitas baterai

Lama penyimpanan baterai (hari)	Kapasitas Baterai (Ah)
3	$563,455 \times \frac{3}{0,8} = 2122,95$
5	$563,455 \times \frac{5}{0,8} = 3.521,59$
6	$563,455 \times \frac{6}{0,8} = 4.225,91$
7	$563,455 \times \frac{7}{0,8} = 4.930,23$

Baterai yang digunakan pada sistem ini adalah Luminous 12v, 200ah. Maka jumlah baterai paralel dan seri dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 3.9 Jumlah baterai

Lama penyimpanan baterai (hari)	Jumlah baterai paralel	Jumlah baterai seri
3	$\frac{2122,95}{200} = 10,6 = 11 \text{ baterai}$	$11 \times \left(\frac{24}{12}\right) = 22 \text{ baterai}$
5	$\frac{3521,59}{200} = 17,6 = 18 \text{ baterai}$	$18 \times \left(\frac{24}{12}\right) = 36 \text{ baterai}$
6	$\frac{4225,91}{200} = 21,12 = 22 \text{ baterai}$	$22 \times \left(\frac{24}{12}\right) = 44 \text{ baterai}$

7	$\frac{4930,23}{200} = 24,65 = 25 \text{ baterai}$	$25 \times \left(\frac{24}{12}\right) = 50 \text{ baterai}$
---	--	---

Nilai tersebut yaitu 0, 11, 18, 22, dan 25 akan dijadikan input pada HOMER dan voltage bus 24 V.

3.5.4. Menentukan Kapasitas Converter dan Inverter

Untuk dapat menentukan ukuran inverter dan bi-directional converter kita harus mengetahui beban puncak pada sistem lalu memilih ukuran yang lebih besar untuk alasan keamanan, karena HOMER mengukur beban puncak sistem sebesar 1,15 kW maka ukuran inverter dan converter ditentukan sebesar 2kW sesuai dengan yang ada di pasaran.

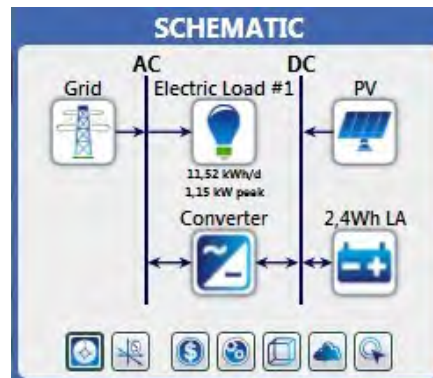
BAB 4

SIMULASI, OPTIMISASI, DAN ANALISIS SISTEM TENAGA PV DAN PV-DIESEL

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, software HOMER digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga PV dan PV-Diesel, agar mampu memenuhi kebutuhan listrik PSSL melalui suatu cara yang ekonomis dan efektif (*cost effective*). Pada tugas akhir ini simulasi dan optimasi dibagi menjadi 2 yaitu pada saat on grid dan off grid, untuk *on grid* hasil simulasi dan optimasi HOMER akan dibandingkan dengan kondisi PSSL saat ini yang menggunakan sistem *grid*. Sedangkan untuk sistem *off grid* akan dibandingkan 2 model sistem yang berbeda yaitu sistem PV dan PV-Diesel, lalu dicari sistem yang paling *cost-effective*. Simulasi dan optimasi menggunakan *discount rate* sebesar 6,37%.

4.1. On Grid

Skematik dari sistem tenaga PV secara on grid ditunjukkan pada gambar 4.1. Komponen dari sistem terdiri dari panel PV, grid, baterai dan inverter. Informasi mengenai biaya, jam operasi, dan *size* tiap komponen untuk kemudian dijadikan input pada HOMER akan dibahas pada sub bab bagian selanjutnya.



Gambar 4.1 Skematik Sistem On Grid

4.1.1. Photovoltaic

PV array merupakan interkoneksi dari modul atau panel PV yang menghasilkan arus searah (DC) dengan nilai yang berbanding lurus terhadap radiasi surya yang mengenai modul atau panel PV tersebut. Informasi mengenai biaya modal (*capital cost*), penggantian (*replacement cost*), operasi dan perawatan (*operation & maintenance cost*) dari PV, beserta dengan informasi mengenai *lifetime* dan derating factor komponen akan dijadikan input pada HOMER. Pada tugas akhir ini, PV yang akan digunakan memiliki harga sebesar Rp.5.900.000,00 untuk 2 panel PV dan diperkirakan biaya pemasangan sebesar Rp.1.000.000,00. Sehingga total dari biaya modal sebesar Rp.6.900.000,00. Asumsi *lifetime* PV yaitu 20 tahun dengan derating factor sebesar 62%.

4.1.2. Baterai

Baterai mampu menyimpan sejumlah listrik DC pada efisiensi energi round-trip tetap dan memiliki batas untuk mengatur seberapa cepat baterai tersebut dapat diisi (*charge*) atau dibuang (*discharge*) tanpa menyebabkan kerusakan pada baterai itu sendiri, dan berapa banyak siklus energi dapat melalui proses tersebut sebelum baterai perlu untuk diganti. HOMER mengasumsikan bahwa sifat dari baterai tetap konstan sepanjang masa dan tidak terpengaruh oleh faktor eksternal seperti suhu.

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, baterai yang digunakan pada sistem ini ialah baterai Luminous 12V 200AH @20 HR RATE SMF Deep Cycle Battery, dengan kapasitas tiap baterainya adalah sebesar 2,4 kWh. Perkiraan umur baterai adalah 5 tahun dengan harga sebesar Rp.3.900.000 dan biaya pemasangan sebesar Rp.100.000,00, tidak ada biaya perawatan karena perawatan baterai yaitu dengan cara menggantinya dengan yang baru. PSSSL memiliki 2 baterai.

4.1.3. Inverter

Inverter yang digunakan pada sistem memiliki kapasitas 3kW dengan biaya sebesar Rp.2.500.000 dan biaya charge controller sebesar Rp.3.390.000 sehingga total biaya modal sebesar Rp5.890.000 dan biaya pengganti komponen (*replacement*) sebesar Rp.2.500.000 dikarenakan tidak perlu lagi membeli charge controller.

4.1.4. Simulasi Sistem *On Grid*

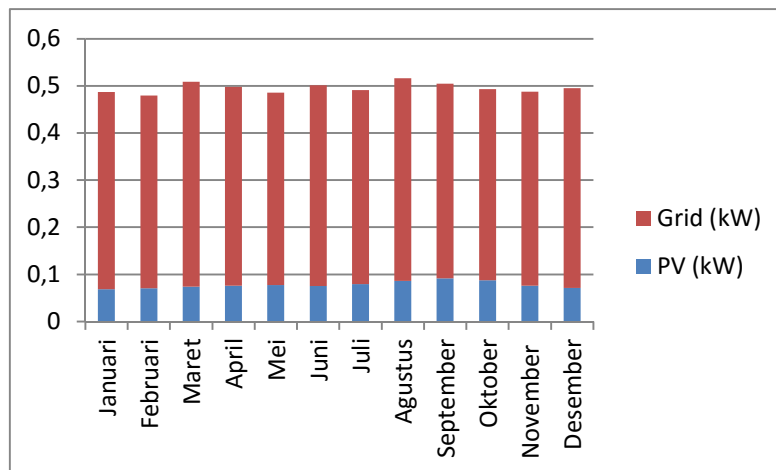
Karakteristik operasional utama seperti produksi energi listrik tahunan (*annual electrical energy production*), beban listrik tahunan (*annual electrical loads served*), kelebihan listrik (*excess electricity*), fraksi energi terbarukan (*renewable energy fraction*), kekurangan kapasitas (*capacity shortage*), beban yang belum terpenuhi (*unmet load*) dan lainnya diperoleh dari hasil simulasi Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Simulasi dan optimasi HOMER

Architecture (kW)						Cost (Rp)			
PV	Diesel	Baterai	Inverter	Grid	Dis pat ch	COE	NPC	OC	IC
0,4	-	-	3	1,15	CC	1.383	109 juta	5,15 Juta	12,8 Juta
-	-	2	3	1,15	LF	1.594	129 Juta	5,62 Juta	20,8 Juta
0,4	-	2	3	1,15	LF	1.644	133 Juta	6,19 Juta	13,9 Juta

Menurut hasil simulasi pada tabel 4.1, terlihat bahwa sistem dengan biaya paling efektif/optimal adalah sistem yang menggunakan PV 0,4 kW, inverter 3 kW dan membeli dari grid sebesar 1,15kW. Hal ini terlihat dari rendahnya *Cost of Electricity* (Rp.1.383,00) dan *Net Present Cost* (Rp.109.000.000) sistem tersebut dari pada sistem lain.

Walaupun biaya modal yang diperlukan untuk sistem ini cukuplah tinggi yaitu Rp.20.800.000,00, namun biaya operasi tiap tahunnya sangatlah rendah yaitu Rp.5.150.000,00 maka dari itu bisa kita simpulkan bahwa sistem ini adalah sistem yang bagus. Mengingat pula bahwa lama proyek ini adalah 25 tahun lamanya. Converter dan PV perlu diganti masing – masing satu kali saat proyek sedang berlangsung, hal ini menyebabkan tingginya biaya total atau *net present cost* yang harus di keluarkan pada masa proyek. Rata – rata produksi listrik tiap bulan dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Rata – rata produksi listrik tiap bulan

Dapat dilihat pada gambar 4.2 bahwa produksi listrik tiap bulan hampir sama walaupun di musim hujan sekalipun (bulan november hingga bulan maret). Hal ini dikarenakan pada saat PV tiak mampu menyuplai maka sistem akan membeli dari grid sesuai dengan kebutuhan dan dikarekana tidak ada baterai yang digunakan pada sistem ini sehingga tidak perlu ada listrik yang digunakan untuk mengisi baterai sehingga rata – rata produksi tiap bulan pun hampir sama. Detail lengkap mengenai produksi listrik, beban sistem, dan informasi penting lainnya terkait sistem tersebut dapat kita lihat pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Produk listrik tahunan sistem

Produksi listrik tahunan (<i>Annual Electricity Production/yr</i>)	
PV-array (kWh/yr)	682 (15,71%)
Pembelian pada grid (kWh/yr)	3.659 (84,29%)
Total produksi (kWh/yr)	4.341 (100%)
Renewable fraction	13 %

Tabel 4.2 Produksi listrik tahunan sistem (lanjutan)

Konsumsi listrik tahunan	
AC primary load served (kWh/yr)	4.205 kWh/yr
Informasi lainnya	
Excess Electricity	0
Emisi	3.260,50 kg/yr
Capacity Shortage	0

Menurut hasil dari simulasi, dapat kita lihat bahwa 84,29 % produksi listrik dihasilkan dari pembelian grid sedangkan 15,71 % sisanya dihasilkan oleh PV. Sehingga dapat kita simpulkan bahwa mayoritas produksi listrik didapatkan dari grid. Hal ini dikarenakan kapasitas PV yang tersedia di lab PSSSL hanya sebesar 0,4 kW. *Excess electricity* dan *capacity shortage* bernilai 0 karena jika terjadi penurunan produksi PV, maka sistem akan membeli langsung dari grid sesuai dengan kebutuhan.

Sedangkan sistem menghasilkan emisi karbon sebesar 3.250,50 kg/yr jika dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan faktor konversi 0,891 kg/kWh (Menteri ESDM no. 3738/600.5/2008). HOMER mampu menentukan emisi yang lebih rendah, walaupun perbedaannya tidak terlalu signifikan.

$$\begin{aligned} \text{Emisi } CO_2 \left(\frac{kg}{yr} \right) &= \text{Jumlah Pemakaian Listrik (kWh)} \times \text{Faktor konversi} \\ &= 3659 \times 0,891 = 3260,169 \text{ kg/yr} \end{aligned}$$

Hasil dari optimasi yang dilakukan oleh HOMER salah satunya ialah berupa cash flow yang dapat kita lihat pada gambar 4 dan tabel 4. Tabel 4.3. memperlihatkan total biaya tahunan untuk setiap komponen pada sistem tenaga PV on grid.

Tabel 4.3 Cash flow sistem on grid

Komponen (Rp)	Modal (Rp)	Penggantian (Rp)	O&M (Rp)	Bahan Bakar (Rp)	Salvage (Rp)	NPC (Rp)
PV	6.900.000	3.862.074	0	0	2.605.398	8.156.676
Inverter	5.890.000	1.819.351	0	0	490.659	7.218.693

Tabel 4.3 Cash flow sistem on grid (lanjutan)

Grid	0	0	94.373.600	0	0	94.373.600
Sistem	12.390.000	5.681.425	94.373.600	0	3.096.056	109.748.968

Dari Tabel dapat kita lihat bahwa biaya total proyek atau *net present cost* adalah Rp.109.748.968. Biaya ini adalah biaya total dari pengeluaran (biaya modal, penggantian, operasi dan perawatan) dikurangi dengan pendapatan (*salvage cost*). Biaya investasi yang didapatkan oleh HOMER jauh lebih rendah ketimbang biaya yang didapatkan menggunakan persamaan ekonomi yang umum digunakan oleh perancang sistem hal ini ditunjukkan pada tabel 4.4, yang mana jelas terlihat bahwa biaya investasi sebesar Rp.139.646.747, atau lebih tinggi sebesar Rp. 29.897.779,00 ketimbang biaya investasi yang telah di optimisasi oleh HOMER.

Tabel 4.4 Cash flow sistem on grid menggunakan persamaan ekonomi secara manual

Komponen (Rp)	Modal (Rp)	Penggantian (Rp)	O&M (Rp)	Bahan Bakar (Rp)	Salvage (Rp)	NPC (Rp)
PV	6.900.000	5.900.000	0	0	4.425.000	8.375.000
Inverter	5.890.000	2.500.000	0	0	1.963.333	6.426.667
Grid	0	0	124.845.080	0	0	124.845.080
Sistem	12.390.000	8.400.000	124.845.080	0	6.388.333	139.646.747

4.1.5. Perbandingan dengan Grid

Agar dapat melihat bahwa sistem yang menggunakan PV 0,4 kW, inverter 3 kW dan membeli dari grid sebesar 1,15kW merupakan sistem dengan biaya yang paling efektif/optimal dibandingkan dengan kondisi PSSSL saat ini, maka sistem tersebut harus dibandingkan dengan pemakaian grid saja. Tabel 4.4 merupakan informasi biaya dari sistem grid pada masa proyek berlangsung (25 tahun).

Tabel 4.5 Biaya grid pada masa proyek

Grid	COE (Rp)	NPC (Rp)	OC (Rp)	IC (Rp)
1,15 kW	1.343	108 Juta	5.65 Juta	0

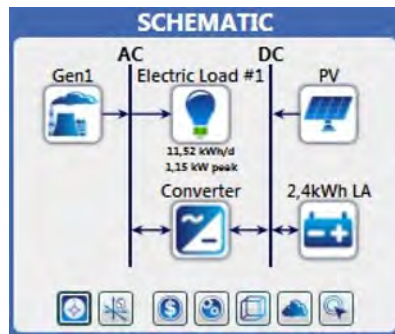
Untuk membandingkan Grid dengan sistem tenaga PV (*on grid*) kita, pertama – pertama kita harus mengetahui semua biaya yang dikeluarkan dan didapatkan saat proyek berlangsung atau dikenal dengan *total net present cost* (NPC). Biaya pengeluaran antara lain adalah biaya modal, penggantian, operasi dan perawatan, dan terakhir biaya bahan bakar. Sedangkan biaya pemasukan adalah biaya *salvage*, biaya *salvage* adalah perkiraan nilai jual atau nilai pasar pada akhir masa pakai dari asset tersebut. Dari tabel 4.3 dan tabel 4.4, dapat kita tentukan tiap NPC dari sistem, maka:

$$\begin{aligned}\text{NPC}(\text{grid}) - \text{NPC}(\text{sistem PV}) &= \text{Rp.108.440.360} - \text{Rp. 111.669.304} \\ &= - \text{Rp. 3.228.944,00}\end{aligned}$$

Menurut perhitungan di atas dapat kita lihat bahwa sistem tenaga on grid lebih mahal ketimbang sistem grid selama selama 1 kali masa proyek (25 tahun). Sistem on grid mengeluarkan biaya Rp.3.228.944,00 (10,7 %) lebih mahal ketimbang sistem grid. Hal ini disebabkan karena tingginya biaya pengadaan komponen / modal dan biaya penggantian komponen pada sistem tenaga PV, walaupun biaya operasi dan perawatan sistem tenaga PV (*on grid*) lebih rendah 8,84% dari sistem grid.

4.2. Off Grid

Skematik dari sistem tenaga PV dan PV-Diesel secara off grid ditunjukkan pada gambar 4. Komponen dari sistem terdiri dari panel PV, baterai, konverter daya dan generator diesel. Informasi mengenai biaya, jam operasi, dan *size* tiap komponen untuk kemudian dijadikan input pada HOMER akan dibahas pada sub bagian selanjutnya



Gambar 4.3 Skematik sistem off grid

4.2.1. Photovoltaic

Seperti simulasi sebelumnya informasi mengenai biaya modal (*capital cost*), penggantian (*replacement cost*), operasi dan perawatan (*Operation & Maintenance cost*) dari PV, beserta dengan informasi mengenai *lifetime* komponen akan dijadikan *input* pada HOMER. PV yang digunakan ialah modul PV 50 WP Shinyoku Polycrystalline dengan harga sebesar Rp.850.000,00 dengan biaya pemasangan sebesar Rp.1.000.000,00 dan biaya O&M sebesar 0 rupiah Melalui perhitungan besar PV yang dipertimbangkan untuk sistem yaitu 0, 4950, 5000, 5050, 5950, 6000, dan 6050 dan *lifetime* diperkirakan selama 20 tahun.

4.2.2. Generator Diesel

Generator yang dipilih memiliki ukuran 0, 1, dan 2 kW. Dengan harga perkiraan sebesar Rp.8.363.333/kW dan biaya operasi dan perawatan sebesar Rp.5.000,00. Pada kolom *lifetime* kita masukkan 5000 jam dengan asumsi kita melakukan perawatan secara intensif. Dikarenakan harga bensin yang berubah – ubah maka pada kolom *sensitivity* untuk harga premium diberikan 3 nilai untuk perbandingan yaitu Rp.6.450,00/L, Rp.6.950,00/L, dan Rp.7.150,00/L.

4.2.3. Baterai

Baterai yang digunakan pada sistem ini ialah baterai Luminous 12V 200AH @20 HR RATE SMF Deep Cycle Battery, dengan kapasitas tiap baterainya adalah sebesar 2,4 kWh tiap string terdapat 2 baterai. Perkiraan umur baterai adalah 5 tahun dengan harga sebesar Rp.3.900.000 dan pemasangan sebesar Rp.100.000,00, tidak ada biaya

perawatan karena perawatan baterai yaitu dengan cara menggantinya dengan yang baru. Melalui perhitungan didapatkan baterai yang dibutuhkan tiap string adalah 0, 5, 11, 18, 22, dan 25 unit baterai.

4.2.4. Bi-directional Converter

Converter yang diperlukan untuk sistem PV-Diesel ialah 2kW dengan biaya pembelian dan penggantian inverter sebesar Rp.4.000.000,00/kW. Dengan estimasi *lifetime* 15 tahun dan efisiensi 85%. Dengan ukuran 0, 1, dan 2 untuk pertimbangan pada HOMER

4.2.5. Inverter

Inverter yang diperlukan untuk sistem PV adalah 2kW dengan biaya pembelian dan penggantian inverter sebesar Rp.2.166.666/kW. Dengan estimasi *lifetime* 15 tahun dan efisiensi 85%. Dengan ukuran 0, 1, dan 2 untuk pertimbangan pada HOMER

4.2.6. Simulasi Sistem Off Grid

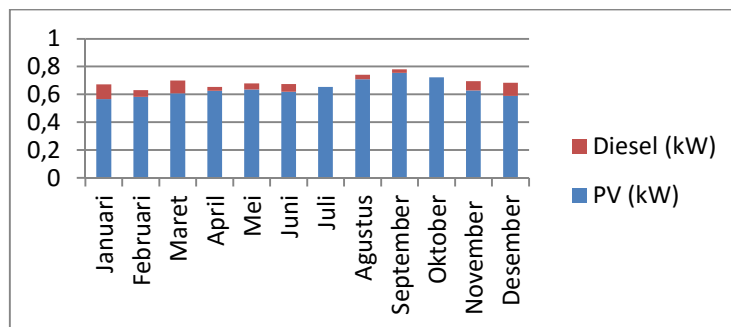
Karakteristik operasional utama seperti produksi energi listrik tahunan (*annual electrical energy production*), beban listrik tahunan (*annual electrical loads served*), kelebihan listrik (*excess electricity*), fraksi energi terbarukan (*renewable energy fraction*), beban yang belum terpenuhi (*unmet load*) dan lainnya diperoleh dari hasil simulasi.

Tabel 4.6 Hasil Simulasi dan Optimasi sistem tenaga PV-Diesel dan PV pada HOMER

Architecture (kW)					Cost (Rp)			
PV	Diesel	Baterai	Converter	Dispatch	COE	NPC	OC	IC
4,95	1	10	2	CC	4.610	372 Juta	6,91 Juta	240 Juta
PV		Baterai	Inverter	Dispatch	COE	NPC	OC	IC
6,05		22	2	LF	5.532	446 Juta	6,59 Juta	320 Juta

Pada tabel 4.8, terlihat bahwa sistem yang memiliki biaya paling efektif/optimal adalah sistem yang menggunakan PV 4,95 kW, diesel 1kW, 10 buah baterai, dan converter 2 kW. Hal ini terlihat dari rendahnya COE Rp.4.610,00 dan NPC Rp.372.000.000,00 sistem

tersebut dari pada sistem PV dengan COE Rp.5.463,00 dan NPC Rp.441.000.000,00. Hal ini dikarenakan dengan ditambahkannya diesel, ukuran PV dan baterai dapat berkurang secara signifikan[7]. Diesel mampu mencharge baterai secara langsung bila cuaca tidak memungkinkan untuk penggunaan PV, sehingga *days of storage* pada baterai bisa dikurangi yang berakibat pada berkurangnya jumlah baterai, jumlah baterai terkecil hasil perhitungan menunjukkan jumlah 11 unit untuk tiap string namun hasil optimasi HOMER menentukan bahwa dengan 5 unit baterai per string saja sudah mampu untuk membuat sistem berjalan sesuai dengan fungsinya, dan juga saat PV tidak mampu menyuplai daya secara keseluruhan maka sebagian dari beban dapat disuplai oleh generator diesel yang juga berakibat pada mengecilnya ukuran PV. Rata – rata produksi listrik tiap bulan dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rata – rata produksi listrik tiap bulan

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa PV tidak sepenuhnya menyuplai beban pada sistem, generator diesel juga turut serta membantu PV menyuplai beban khususnya di bulan – bulan di mana sinar matahari berkurang atau sedang terjadi musim hujan, yaitu pada bulan november hingga bulan maret. Detail lengkap mengenai produksi listrik, beban sistem, dan informasi penting lainnya yang kita dapat dari HOMER dapat kita lihat pada tabel berikut.

Tabel 4.7 Produksi listrik tahunan sistem off grid

Produksi listrik tahunan (<i>Annual Electricity Production/yr</i>)	
PV-array (kWh/yr)	5.813 (93,43%)
Generator diesel (kWh/yr)	409 (6,57%)
Total produksi (kWh/yr)	6.221 (100%)
Renewable fraction	89.8%
Konsumsi listrik tahunan	
AC primary load served	4.205 kWh/yr
Informasi lainnya	
Excess Electricity (kWh/yr)	906,0
Capacity Shortage (kWh/yr)	0
Emisi CO ₂ (kg/yr)	361,27

Pada tabel 4.6 terlihat bahwa kelebihan produksi tenaga listrik atau *excess electricity* sebesar 906,0 kWh/yr. Hal ini terjadi dikarenakan pada saat menentukan ukuran PV, kita memilih bulan dengan rata – rata sinar matahari terendah tiap harinya (januari) maka dari itu saat sinar matahari berlimpah maka produksi tenaga listrik pun menjadi berlebih. Sedangkan sistem menghasilkan emisi karbon sebesar 361,27 kg/yr jika dibandingkan dengan hasil perhitungan, HOMER menentukan emisi yang lebih rendah walaupun perbedaanya tidak terlalu signifikan. Sedangkan untuk hasil techno-economic HOMER dapat kita lihat pada Tabel 4.7 berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Emisi } CO_2 \left(\frac{kg}{yr} \right) &= \text{Jumlah BBM (L)} \times \text{Faktor konversi} \times GWP \\
 &= 137,19 \times 2,6413 \times 1 = 362,35 \text{ kg/yr}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.8 Cashflow sistem off grid HOMER

Komponen (Rp)	Modal (Rp)	Penggantian (Rp)	O&M (Rp)	Fuel	Salvage (Rp)	NPC (Rp)
PV	183.149.984	84.149.992	0	0	63.112.496	204.187.472
Diesel	8.363.334	16.726.666	53.000.000	22.121.894	7.359.733	92.852.136
Baterai	40.000.000	78.000.000	0	0	19.500.000	98.500.000
Converter	8.000.000	8.000.000	0	0	2.666.667	13.333.333
Sistem	239.513.312	186.876.656	53.000.000	22.121.894	93.638.896	408.872.864

Dapat kita lihat bahwa tabel 4.7 kemudian akan kita bandingkan dengan perhitungan manual yang biasa digunakan perancang sistem pada umumnya. Biaya dengan menggunakan metode perhitungan ekonomi dengan persamaan yang sudah dijelaskan pada bab 3 dapat kita lihat pada tabel 4.8

Tabel 4.9 Cashflow menggunakan persamaan ekonomi secara manual

Komponen (Rp)	Modal (Rp)	Penggantian (Rp)	O&M (Rp)	Fuel	Salvage (Rp)	NPC (Rp)
PV	183.150.000	84.150.000	0	0	63.112.500	204.187.500
Diesel	8.363.333	16.726.666	53.000.000	22.121.888	7.359.733	92.852.153
Baterai	40.000.000	78.000.000	0	0	19.500.000	98.500.000
Converter	8.000.000	8.000.000	0	0	2.666.667	13.333.333
Sistem	239.513.333	186.876.666	53.000.000	22.121.888	92.638.900	408.872.987

Dari tabel 4.7 dan 4.8 dapat terlihat perbedaan pada biaya investasi yang hampir sama ini dikarenakan pada perhitungan manual dan menggunakan HOMER kita tidak memperhitungkan nilai *discount rate*

dan *inflation rate* sehingga menyebabkan perhitungan biaya linear. Umumnya, perhitungan semacam inilah yang biasa dilakukan oleh investor untuk memperkirakan biaya investasi yang akan dikeluarkan pada saat proyek berlangsung.

Namun, pada kenyataannya harga dan biaya komponen dapat berubah-ubah sewaktu-waktu dikarenakan *discount* dan *inflation rate*. Maka dari itu, ketika kita menginputkan *discount rate* (6,37) dan *inflation rate* (4,14) sesuai dengan kondisi di Indonesia maka HOMER dapat memperkirakan terjadinya penurunan dan kenaikan harga pada tiap komponen yang berakibat pada rendahnya biaya investasi yang akan kita keluarkan saat masa proyek berlangsung. Hal ini dapat kita lihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Cashflow dengan memperhitungkan *discount rate* dan *inflation rate*

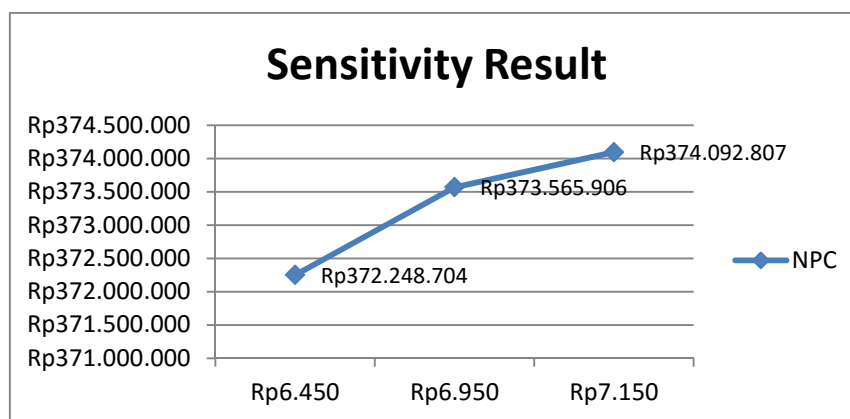
Komponen (Rp)	Modal (Rp)	Penggantian (Rp)	O&M (Rp)	Fuel	Salvage (Rp)	NPC (Rp)
PV	183.149.984	55.083.644	0	0	37.160.032	201.073.600
Diesel	8.363.334	11.588.64	40.711.072	16.992.562	4.333.341	73.322.088
Baterai	40.000.000	57.082.564	0	0	11.481.413	85.601.144
Converter	8.000.000	5.821.923	0	0	1.570.108	12.251.815
Sistem	239.513.312	129.576.600	40.711.072	16.992.562	54.544.896	372.248.704

Terlihat bahwa terdapat perbedaan biaya investasi sebesar Rp.36.624.283 antara sistem yang memperhitungkan *discount* dan *inflation rate* dan yang tidak memperhitungkan kedua hal tersebut.

4.2.7. *Sensitivity Result*

Alasan kita melakukan analisa sensitivitas adalah karena kita harus menyiapkan biaya cadangan apabila terjadi perubahan dalam suatu sistem di masa mendatang dan dalam tugas akhir ini diberikan contoh

pada harga bensin/premium yang mana dalam kenyataannya harga BBM pada umumnya dapat berubah – ubah setiap waktu. Pada generator diesel kita memberikan 3 nilai yang berbeda untuk harga premium yaitu Rp.6.450,00/L, Rp.6.950,00/L, dan Rp.7.150,00/L. Akibat dari perubahan harga premium terhadap NPC dapat kita lihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Efek perubahan harga bensin terhadap NPC menggunakan HOMER

Gambar di atas memperlihatkan efek dari perubahan harga bensin dengan biaya NPC, semakin tinggi harga bensin maka NPC pun juga akan meningkat hal ini terjadi dikarenakan harga bensin mempengaruhi biaya operasi generator diesel sehingga meningkatnya biaya operasi maka akan disertai dengan kenaikan biaya NPC..

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui proses simulasi, optimasi, dan analisa data menggunakan HOMER. Didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sistem tenaga PV *microgrid* skala laboratorium PSSSL saat on grid, biayanya akan selalu lebih tinggi (Rp.111.669.304,00) jika dibandingkan dengan sistem grid saat ini (Rp.108.440.360,00) perbedaannya sebesar Rp. 3.228.944,00 untuk 1 kali masa proyek (25 tahun). Di karenakan saat kita mendesain sistem *microgrid on grid* kita harus mengeluarkan biaya untuk pengadaan komponen dan perawatan yang harus dikeluarkan pada sistem *microgrid*. Sehingga tidak direkomendasikan untuk dilakukan.
2. Sedangkan pada sistem tenaga PV dan PV-Diesel *microgrid* skala laboratorium PSSSL kombinasi sistem yang memiliki biaya paling efektif/optimal adalah sistem PV-Diesel dengan menggunakan PV 4,95 kW, diesel 1kW, 10 buah baterai, dan converter 2 kW COE Rp.4.610,00 dan NPC Rp.372.248.704,00 dibanding dengan sistem PV saja. Hal ini dikarenakan dengan ditambahkannya diesel, ukuran PV dan jumlah baterai dapat berkurang secara signifikan.
3. Dari hasil analisa sensitivitas, dapat disimpulkan bahwa kenaikan biaya bahan bakar generator diesel (preimum) berakibat pada naiknya biaya NPC secara keseluruhan.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berkaca dari hasil HOMER pada *microgrid* saat on grid dan off grid terlihat bahwa biaya sistem sangatlah besar. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil dengan biaya yang lebih terjangkau.
2. Penggunaan software HOMER lebih sesuai untuk tempat yang belum tersambung dengan grid, karena biaya memperpanjang saluran transmisi grid akan jauh lebih

mahal ketimbang menggunakan sistem dengan energi terbarukan yang dipadukan dengan simulasi dan optimalisasi oleh HOMER.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mitra I, DegnerT, and Braun M. Distributed generation and *microgrids* for small island electrification in developing countries: a review. *SolEnergySocIndia* 2008;18(1):6–20.
- [2] Sen, R. and Bhattacharyya, S.C., 2014. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*, 62, pp.388-398.
- [3] Fathima, A.H. and Palanisamy, K., 2015. Optimization in *microgrids* with hybrid energy systems–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp.431-446.
- [4] Al-Karaghoul, A. and Kazmerski, L.L., 2010. Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software. *Solar Energy*, 84(4), pp.710-714.
- [5] Abdullah Hadi Bin Saifollah, “Feasibility study of pv-wind and pv-diesel hybrid power system in Malaysia,” 2013.
- [6] A. Hina Fahitma and K. Palanisamy, 2015, Optimization in *microgrids* with hybrid energy systems – A review.
- [7] Gilbert M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems”.

INDEKS

A

Adjusted wattage, 26

B

Baterai, xxi, 12, 13, 29, 31, 34,
35, 40, 41, 44

C

Clearness Index, 22

CO₂, 16, 43

Converter, 15, 16, 31, 36, 41,
44

Cost Of Energy, 20

D

Derating Factor, 29

Diesel, vii, ix, xi, 1, 2, 3, 4, 5,
15, 33, 35, 39, 40, 41, 42, 44,
47

Dispatch, 35, 41

E

Estimasi Biaya, 25

Excess electricity, 37

G

GWP, 16, 44

H

HOMER, vii, ix, xxi, 2, 3, 4, 5,
17, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 27,
28, 29, 31, 33, 34, 35, 37, 40,
41, 42, 43, 47, 49

I

Initial Capital, 19, 20

Inverter, 11, 12, 31, 35, 38, 41

M

Microgrid, vii, ix, xi, 1, 2, 3, 7,
22, 23, 24, 25

N

NPC, vii, ix, xxi, 17, 19, 35,
38, 39, 41, 42, 44, 45, 47

O

Off Grid, 39, 41

On Grid, 33, 34, 35

Operating Cost, 20

Optimal, vii, 2, 7, 17, 18, 19,
35, 39, 42, 47

OPTIMISASI, 33

P

Photovoltaic, xxi, 8, 9, 34, 40

R

Renewable energy, 1, 5, 35, 41,
49

Renewable fraction, 37, 43

Renewable Fraction, 21

S

Salvage, 21, 38, 44

SCADA, xxi, 8

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Jatrifa Jiwa Gandhi lahir di Malang pada tanggal 27 April 1994. Merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara. Penulis lulus dari SMAN 1 Malang pada tahun 2012 dan melanjutkan pendidikan S1 Jurusan Teknik Elektro ITS. Selama masa perkuliahan penulis aktif di berbagai organisasi mulai dari HIMATEKTRO sebagai Ketua Biro Pelatihan PSDM (2014-2015) dan SPE sebagai member (2014-2015). Penulis juga berhasil meraih beragam prestasi mulai dari kancan nasional hingga internasional, diantaranya adalah Finalis Scientist in Action (2016), perwakilan Indonesia di Young Engineers Scientist Summit se-ASEAN (YES Summit), perwakilan Indonesia di Asia-Africa Smart City Summit, awardee XL Future Leaders batch 3, dan awardee E40 Scholarship.

Email : jatrifa12@mhs.ee.its.ac.id